

УДК 524.4

## СБЛИЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С РАССЕЯННЫМИ ЗВЕЗДНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ

© 2020 г. М. Д. Сизова<sup>1,\*</sup>, С. В. Верещагин<sup>1</sup>, Б. М. Шустов<sup>1</sup>, Н. В. Чупина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: sizova@inasan.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

Рассчитаны моменты времени и минимальные расстояния прохождений более 100 рассеянных звездных скоплений (РЗС) около Солнечной системы на протяжении последних 5 млн. лет. Показано, что минимальные расстояния сближения центров РЗС с Солнечной системой, как правило, превосходили 60 пк. Скопление Гиады сближалось с Солнечной системой на ~25 пк. Влияние таких сближений на движение комет во внешних областях облака Оорта сравнимо и даже может превышать эффект от сближений с отдельными звездами. Проведено сравнение положений на небе антиапексов скоплений и афелиев долгопериодических комет. Выявлены случаи их близких положений для некоторых комет и межзвездного астероида 11/2017 U1 (Oumuaatua). Сделаны оценки частоты прохождений РЗС в окрестностях Солнечной системы. Сближения на расстояние 25 пк происходят с частотой ~20 раз за миллиард лет.

DOI: 10.31857/S0004629920090054

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Резервуаром долгопериодических комет является облако Оорта (см., например, [1]). Поскольку кометы в облаке Оорта гравитационно слабо связаны с Солнцем, их орбиты могут испытывать относительно сильные возмущения от сближений с различными компактными гравитирующими массами (молекулярными облаками, звездными скоплениями, звездами, межзвездными телами дозвездной массы – коричневыми карликами, межзвездными планетами). Некоторые такие сближения могут вызывать, в частности, временное увеличение потока комет, попадающих во внутреннюю Солнечную систему, т.н. “кометные ливни”. Мы не рассматриваем здесь влияние т.н. галактических приливов на Солнечную систему, хотя в общем плане оно также существенно (см., например, недавнюю работу [2] и ссылки в ней) и оказывает существенное влияние на параметры орбит комет (см., например, [3]). Силы галактических приливов мало меняются на короткой шкале времени (несколько миллионов лет), а в данной работе нас интересуют именно заметные и достаточно частые локальные возмущения гравитационного поля. Мы также не рассматривали сближения с молекулярными облаками. В обычных условиях этот эффект не столь существенен по сравнению со звездными сближениями [4, 5], хотя при определенных условиях (движение Сол-

нечной системы в плотном гигантском молекулярном облаке между многочисленными массивными сгустками) эффект от таких сближений может быть значительным [6]. Что касается коричневых карликов и межзвездных планет, то пока что наблюдательная статистика таких объектов весьма неполна. Возможно, что их количество относительно невелико по сравнению со звездами [7]. Также важно отметить, что массы таких объектов относительно малы и существенное влияние могут оказать только сближения на малые расстояния, а такие сближения весьма редки. Поэтому мы ограничились рассмотрением сближений со звездами и рассеянными звездными скоплениями. Шаровых скоплений в Галактике как минимум на пару порядков меньше, чем рассеянных, и их учет общую картину вряд ли изменит.

Основным фактором гравитационных возмущений, влияющих на динамику внешних областей Солнечной системы, являются сближения со звездами. В работах [2, 8] обнаружено множество звезд – кандидатов на такие сближения как в прошлом, так и в будущем. При определенных условиях эти процессы могут вызывать перемещения комет на более близкие или далекие расстояния от Солнца, включая орбиты ухода из Солнечной системы. Если в первом случае могут появиться наблюдаемые долгопериодические кометы, то во втором – межзвездные малые тела.

Таблица 1. Данные о РЗС из каталога MWSC

MWSC	Название	RAJ2000, град	DEJ2000, град	pmRA, мсд/год	pmDE, мсд/год	$d$ , пк	$RV$ , км/с	$r2$ , град	$N/sr2$
2020	Melotte 111	185.985	26.300	-11.72	-8.76	87	-1.0	4.225	298
544	Mamajek 3	81.502	6.330	10.00	-32.24	95	13.1	2.200	40
1535	Mamajek 1	130.470	-79.045	-29.41	27.40	112	15.0	0.420	19
278	Alessi 13	52.020	-35.870	35.80	-3.27	112	19.5	3.180	209
1990	Feigelson 1	180.300	-78.335	-40.45	-3.91	117	13.7	0.950	26
305	Melotte 22	56.505	24.370	19.40	-46.00	130	5.5	6.20	488
1629	Platais 8	136.875	-59.160	-15.00	14.80	141	17.3	1.500	1377
1841	IC 2602	160.440	-64.400	-16.95	9.65	151	21.9	1.480	3229
1529	IC 2391	130.065	-53.028	-24.20	23.42	165	14.6	0.775	139
395	Platais 3	69.450	71.470	3.35	-21.15	170	7.0	2.250	174
2650	Mamajek 2	264.472	-8.085	-11.50	-20.90	174	-18.5	0.310	17
274	Melotte 20	51.675	48.800	21.49	-26.11	175	-1.4	6.100	621
1527	NGC 2632	130.095	19.690	-36.54	-13.36	187	33.4	3.100	511
1308	NGC 2451A	115.335	-38.520	-21.80	15.13	188	22.6	1.300	297
109	Platais 2	18.225	32.050	13.85	-11.29	190	6.5	1.320	64
1639	Platais 9	137.955	-43.530	-24.50	12.00	200	17.8	2.100	2277

Участвуют ли в этих процессах звездные скопления? За время существования Солнечной системы звездные скопления могли многократно приближаться к Солнечной системе. Учитывая оценку их числа в Галактике ( $10^5$  РЗС согласно [9, 10]), на протяжении жизни Солнечной системы эффект может оказаться значительным, и тогда его нужно учитывать при исследованиях динамической эволюции ансамбля комет во внешних частях облака Оорта. Кроме того, отдельные звезды скоплений и, особенно, их шлейфов (приливных хвостов) могли подходить к Солнечной системе на более близкие расстояния. По данным эксперимента Gaia в [11, 12] получены убедительные доказательства существования масштабных ( $\sim 100$  пк) шлейфов звезд, потерянных скоплением Гиады. Возможно, что Гиады занимают еще более обширную область, образуя поток Гиад [13, 14]. Звездные потоки, как правило, связаны со скоплениями. Изучение наблюдаемых данных о пространственных скоростях ближайших к Солнцу пяти потоков Coma Berenices, Sirius, Hyades, Pleiades и Hercules, выполненное в работе [15], показало совпадение кинематических параметров объекта И/2017 U1 Oumuamua (далее И, [16, 17]) и субпотока S2 Плеяд в [18]. Авторы [19] добавили еще одного кандидата в источники объекта И – ассоциацию Columba.

В данной работе представлены результаты поиска близких прохождений РЗС близ Солнечной системы, обсуждаются возможные последствия таких сближений с Солнечной системой. В разделе 2 описаны использованные данные. В разделе

3 представлены диаграммы, позволяющие сопоставить положения афелиев долгопериодических комет, отобранных в работе [20], и антиапексов ближайших к Солнцу скоплений. На первом этапе рассмотрены РЗС, расположенные на расстояниях до 200 пк от Солнца, затем включены и более далекие скопления. В разделе 4 описан метод и результаты поиска возможных пространственных сближений РЗС с Солнечной системой. Сближения искались путем интегрирования орбит РЗС на 5 млн. лет назад. Для скопления Гиады выявлено сближение ядра скопления с Солнечной системой и ряд сближений отдельных звезд приливных хвостов. Также в разделе 4 представлена оценка частоты сближений РЗС с Солнечной системой. В разделе 5 даны выводы.

## 2. ДАННЫЕ

Использованы данные о 16 РЗС из каталога Milky Way global survey of star clusters (далее MWSC; Харченко и др. [21]). Все они расположены в пределах 200 пк от Солнца и для них имеются надежные наблюдательные данные. В табл. 1 приведены сведения об этих скоплениях: номер скопления по каталогу MWSC, название скопления по другим каталогам, прямое восхождение и склонение на эпоху J2000, собственные движения, расстояние от Солнца ( $d$ ), лучевая скорость ( $RV$ ), угловой радиус ( $r2$ ), число звезд в скоплении ( $N/sr2$ ) для радиуса  $r2$ . Для удобства работы с программами вычислений были сохранены неко-

Таблица 2. Вычисленные параметры РЗС

MWSC	$X$ , пк	$Y$ , пк	$Z$ , пк	$U$ , км/с	$V$ , км/с	$W$ , км/с	$V_{cl}$ , км/с	$aAL$ , град	$aAB$ , град
2020	-7.30	-5.92	86.49	-2.29	-5.45	-1.57	6.12	67.23	14.92
0544	-87.40	-26.82	-25.84	-6.80	-17.55	-6.93	20.06	68.81	20.23
1535	39.81	-96.17	-41.36	-14.48	-18.86	-10.70	26.07	52.45	24.24
0278	-33.79	-53.24	-92.56	-13.86	-22.87	-5.38	27.28	58.78	11.38
1990	56.84	-97.23	-31.69	-12.84	-20.70	-10.09	26.38	58.16	22.53
0305	-115.78	28.44	-51.81	-6.49	-27.08	-14.15	31.86	76.50	26.97
1629	18.30	-138.48	-19.21	-11.70	-18.71	-3.21	22.30	57.97	8.30
1841	50.17	-141.82	-13.07	-5.87	-25.24	-1.64	25.97	76.90	3.67
1529	0.94	-163.81	-19.73	-25.94	-14.16	-5.75	30.11	28.62	11.00
0395	-123.21	107.28	47.01	-16.66	-5.22	-6.45	18.61	17.39	20.24
2650	162.52	49.78	37.22	-11.43	-24.06	-4.41	27.00	64.61	9.42
0274	-146.60	93.46	-19.91	-12.53	-23.91	-7.70	28.07	62.34	15.94
1527	-141.92	-68.87	100.42	-42.05	-20.28	-11.14	48.00	25.75	13.42
1308	-56.03	-177.69	-25.12	-26.48	-13.65	-13.47	32.70	27.24	24.32
0109	-101.15	128.50	-96.73	-11.18	-7.45	-10.98	17.35	33.66	39.25
1639	-12.28	-199.30	11.38	-25.25	-16.77	-8.13	31.38	33.56	15.01

Таблица 3. Параметры новых комет, рассматриваемых в данной работе

Название кометы	$x$	$q$ , а.е.	$B$ , град	$L$ , град	$a$ , $10^3$ а.е.	$P$ , $10^6$ лет
C/2006 K1	13	4.43	66	56	77	21.3
C/1991 F2	16	1.52	30	90	62	15.6
C/1984 W2	20	4.00	33	80	50	11.2
C/1999 F1	38	5.79	15	100	26	4.2
C/1999 U1	38	4.14	25	67	26	4.2
C/2005 L173	44	3.89	23	50	23	3.4
C/2006 K3	56	2.50	47	23	18	2.3

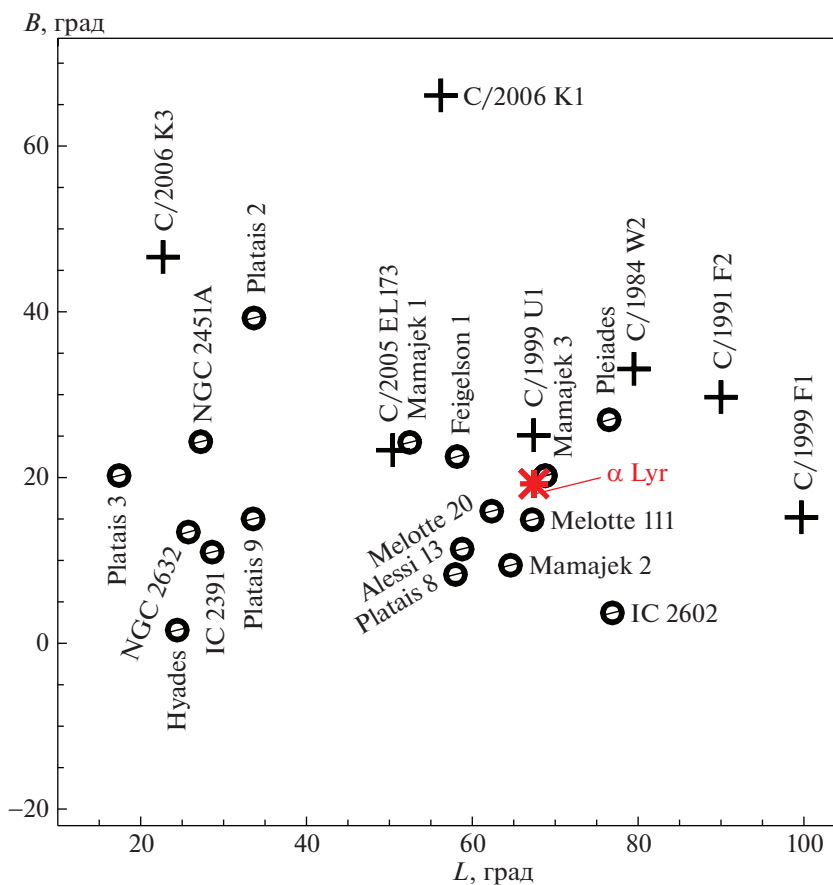
торые обозначения, введенные в используемых каталогах. Так, прямое восхождение  $\alpha$  на эпоху J2000 обозначено как RAJ2000, склонение  $\delta$  – DEJ2000, собственные движения по прямому восхождению и склонению обозначены не традиционно  $\mu_\alpha$  и  $\mu_\delta$ , а pmRA и pmDE соответственно, лучевая скорость – RV.

В табл. 2 представлены рассчитанные для этих скоплений компоненты прямоугольных пространственных координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и скоростей  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , модуль пространственной скорости  $V_{cl} = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ , а также положения антиапексов в галактической системе координат  $aAL$ ,  $aAB$ . Прямоугольная галактическая гелиоцентрическая система координат задана так: ось  $X$  направлена к центру Галактики ( $l = 0^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ), ось  $Y$  – в направлении вращения Галактики ( $l = 90^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ), ось  $Z$  – на северный полюс Галактики ( $b =$

$= 90^\circ$ ). Аналогичны направления осей для компонентов скорости  $U$ ,  $V$ ,  $W$ .

Данные о параметрах орбит впервые обнаруженных долгопериодических комет (“новых комет”) взяты из работы [20] и представлены в табл. 3. В колонках табл. 3 содержатся название кометы, величина большой полуоси орбиты  $a$ , значение фактора  $x$ , характеризующего энергию гравитационной связи кометы в Солнечной системе ( $x = 10^6/a$ ), перигелийное расстояние  $q$ , галактические координаты радианта  $B$  и  $L$  и орбитальный период  $P$ .

В табл. 3 содержатся данные не для всех 102 комет из списка [20], а лишь для тех, положения радиантов которых оказались в пределах менее  $10^\circ$  от положения антиапекса хотя бы одного из РЗС в табл. 1. Таких комет оказалось 7.



**Рис. 1.** LB-диаграмма для афелиев комет (крестики) и антиапексов РЗС (жирные точки). Приведены названия РЗС и комет (близ соответствующих символов). Звездочкой обозначено положение звезды  $\alpha$  Lyr ( $l = 67.448^\circ$ ,  $b = 19.237^\circ$ ), с которым приблизительно совпадает радиант объекта II.

### 3. ДИАГРАММЫ АПЕКСОВ

Индивидуальным апексом звезды мы называем точку на небесной сфере с координатами ( $A$ ,  $D$ ) в экваториальной системе координат ( $A$  – прямое восхождение,  $D$  – склонение), на которую направлен вектор, параллельный вектору пространственной скорости звезды, отложенный от точки наблюдения. Мы рассматриваем ниже не апексы, а антиапексы. На небесной сфере антиапексы и апексы находятся в диаметрально противоположных точках, координаты которых по долготе имеют разницу в  $180^\circ$ , а по широте отличаются знаком. Это определение неприменимо для таких межзвездных объектов, как II, вектор движения которых испытывает сильное изменение вследствие прохождения через Солнечную систему. Здесь правильнее говорить о радианте (для входящей ветви орбиты) и апексе для уходящей ветви орбиты. Разумеется, такой же, как и для скоплений, симметрии в положениях радианта и апекса здесь нет.

Аналогом антиапексов в движении комет можно считать положения афелиев орбит комет. Счи-

тается, что если положения антиапексов звезд (скоплений) и афелиев долгопериодических комет, не прошедших перигелий, совпадают, то эти объекты движутся примерно из одной точки неба в близких направлениях. Для поиска закономерностей в положениях апексов (или антиапексов) звезд (скоплений) применяют метод AD-диаграмм. Описание метода, технику построения диаграмм и формулы для определения эллипсов ошибок можно найти в работе [22]. Здесь применен аналог метода AD-диаграмм – метод LB-диаграмм.

На рис. 1 показана LB-диаграмма, на которой сопоставлены положения антиапексов рассматриваемых скоплений (из табл. 2) и афелиев комет (из табл. 3). Положение точки радианта объекта II также находится в пределах рассмотренной области, близ направления на звезду  $\alpha$  Lyr (показано на рисунке).

На рис. 1 заметна близость положений для следующих пар РЗС – комета: Mamajek 1 – C/2005 EL173; Pleiades – C/1984 W2; Mamajek 3 – II и Melotte 111 – II, а также Mamajek 3 – C/1999 U1.

Близкое расположение точек указывает на возможное динамическое взаимодействие кометы и скопления в прошлом. Воздействие от двух рядом расположенных скоплений дает больший эффект.

Близость положений П1 и Матажек 3 представляет отдельный интерес. Скорость П1 составляет 26.33 км/с относительно Солнца [19]. Как видно из табл. 1, лучевая скорость Матажек 3 составляет 13.1 км/с, а пространственная (вычислена по компонентам пространственной скорости из табл. 2) составляет 20.06 км/с. Вопрос о более детальном изучении возможной связи этих объектов не входит в рамки данной работы. Близость положений точек П1 и Pleiades на рис. 1 независимо подтверждает упоминавшийся во Введении результат, полученный в [18], о совпадении кинематических параметров П1 и субпотока S2 в потоке Плеяды.

#### 4. СБЛИЖЕНИЯ С РЗС В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИСКЕ

##### 4.1. Расчеты сближений ближайших РЗС с Солнечной системой

Для оценки возможного гравитационного взаимодействия скоплений и комет уточним используемое здесь понятие сближения. Это сближение РЗС и Солнечной системы на минимальное расстояние  $d_{\min}$  на рассматриваемом временном интервале. В наших расчетах  $d_{\min}$  определяется на временном интервале интегрирования, равном 5 млн. лет. Момент сближения обозначен как  $t_{\min}$ .

Для расчета движения РЗС использовался пакет galru, созданный Бови [23], написанный на языке программирования Python. Принято классическое (по терминологии galru) представление потенциала Млечного Пути (Milky-Way-like potential, [23]), а именно: Галактика представлена трехкомпонентной моделью, включающей гало радиусом 16 кпк, диск толщиной 280 пк и радиусом 16 кпк, балдж размером 3 на 8 кпк. Плотность вещества в окрестностях Солнца  $0.10 \pm 0.01 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$ . В суммарный потенциал включен компонент, определяемый сферически-симметричным распределением плотности темной материи в гало по профилю Наварро-Френка-Уайта [24]. Диск представлен согласно Миямото-Нагаи [25]. Не учитывалось влияние спиральных волн плотности и сверхмассивной черной дыры в центре Галактики. В модели Солнце расположено на расстоянии  $R_0 = 8$  кпк от центра Галактики над плоскостью диска ( $Z = 21$  пк), скорость вращения диска здесь составляет  $V_0 = 220$  км/с.

Орбита в пакете galru может быть инициализирована в различных системах координат. Мы генерировали орбиты, используя в качестве входных данных либо RA J2000, DE J2000, pmRA,

pmDE, RV, либо RAJ2000, DEJ2000,  $d$  (distance),  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . Кроме того, мы использовали такую возможность galru, как получение входных параметров по запросу в базу данных SIMBAD [26] по имени объекта.

Параметры орбиты зависят от выбора входных данных, в частности, таких как  $R_0$  и  $V_0$ . Значение  $R_0$  определено в десятках публикаций. Разные авторы получили значения от 7.4 до 8.7 кпк. В работе Малкина [27] исследовался так называемый “эффект объединения большинства”, описываемый близостью к ранее опубликованным и ожидаемым результатам отбора. Оказалось, что практически невозможно выбрать наиболее надежное значение  $R_0$ . Изменение  $V_0$  приводит к сдвигу во времени: увеличение  $V_0$  приведет к более раннему сближению и наоборот.

Для определения  $d_{\min}$  и  $t_{\min}$  мы смоделировали орбиты РЗС и Солнца и определили их положения в Галактике с шагом по времени  $10^4$  лет, отсчитывая назад от современного значения  $t_0 = 0$ . На каждом шаге мы вычисляли расстояние между Солнцем и объектом и оставляли минимальное из этих расстояний, запоминая при этом, в какой момент времени объекты сблизились на это расстояние. Таким образом, на интервале времени от 0 до 5 млн. лет назад были определены  $d_{\min}$  и  $t_{\min}$  для всех отобранных скоплений. Алгоритм, описание и результат моделирования, в том числе полный список результатов из п. 4.3, можно найти по адресу <https://github.com/sizovamr/Rapprochement-Effects-of-the-Solar-System-and-Open-Star-Clusters.git>.

При определенных условиях и приближениях, принятых в работе Рикмана [28], для оценки  $V_p$  может быть использована формула  $V_p = 2GM_{\text{comet}}/(Vd_{\min}^2)$ , где  $G$  – гравитационная постоянная,  $V$  – пространственная скорость объекта (здесь РЗС) относительно Солнца,  $r_{\text{comet}}$  – расстояние между кометой и Солнцем. Поскольку мы рассматриваем кометы, расположенные вблизи внешней границы облака Оорта, взято  $r_{\text{comet}}$  равным 0.5 пк.

Результаты моделирования –  $d_{\min}$ ,  $t_{\min}$  и максимальное приращение скорости  $V_p$  кометы – приведены в табл. 4, в колонках которой для удобства также содержатся (повторены) номер по каталогу MWSC, название скопления или номер по другим каталогам, расстояние  $d$  и возраст  $t$  скопления по MWSC, масса скопления (из каталога [29]).

Рассчитанные значения  $d_{\min}$  и соответствующее им  $t_{\min}$  также представлены на рис. 2.

Отметим, что Feigelson 1 (MWSC 1990) и Matajek 1 (eta Cha Association) представляют собой звездные потоки, в связи с чем требуют отдельного рассмотрения.

**Таблица 4.** Результаты моделирования сближений скоплений с Солнечной системой

MWSC	Название	Масса, $M_{\text{Sun}}$	$d$ , пк	$t$ , млн. лет	$V_p$ , м/с	$d_{\text{min}}$ , пк	$t_{\text{min}}$ , млн. лет
2020	Melotte 111	57.5	87.0	691.8	0.0326	87.0	0.0
544	Mamajek 3	40*	95.0	31.6	0.0028	72.3	-3.0
1535	Mamajek 1	40.0	112.0	9.8	0.0014	76.3	-2.4
278	Alessi 13	17.3	112.0	524.8	0.0007	91.5	-3.0
1990	Feigelson 1	26*	117.0	4.0	0.0009	99.9	-2.4
305	Melotte 22	282.1	130.0	141.3	0.0134	128.0	-0.8
1629	Platais 8	38.3	141.0	56.2	0.0012	88.7	-4.8
1841	IC 2602	141.8	151.0	221.3	0.0042	81.5	-4.8
1529	IC 2391	70.2	165.0	112.2	0.0010	144.0	-2.6
395	Platais 3	29.5	170.0	631.0	0.0007	156.5	-3.8
2650	Mamajek 2	17*	174.0	125.9	0.0001	174.0	0.0
274	Melotte 20	243.0	175.0	50.1	0.0243	175.0	0.0
1527	NGC 2632	284.3	187.0	831.8	0.0021	132.4	-2.8
1308	NGC 2451A	98.8	188.0	57.5	0.0010	135.0	-4.0
109	Platais 2	8.9	190.0	205.6	0.0002	174.4	-4.4
1639	Platais 9	55.6	200.0	123.0	0.0005	163.8	-3.6
	Melotte 25	435.0	47.0	625.0	0.1160	24.8	-0.9

\* – число звезд (N<sub>Isr2</sub> из MWSC) в случае отсутствия данных о массе скопления.

#### 4.2. Расчеты параметров сближения Гиад с Солнечной системой

РЗС Гиады (Melotte 25) испытало наибольшее сближение с Солнцем ( $d_{\text{min}} = 24.8$  пк) 0.9 млн. лет назад [30]. На рис. 2 видно, что среди рассмотренных РЗС это скопление проходило ближе всех к Солнечной системе. По данным Gaia DR2 [31] было обнаружено, что скопление Гиады растянуто вдоль пространственной орбиты на десятки парсек [11, 12]. При такой протяженности (100 пк от центра скопления) звезды окраин скопления могут подходить к Солнечной системе гораздо ближе, чем ядро скопления. На рис. 3 показано положение звезд скопления (включая звезды шлейфа) в галактической прямоугольной системе координат.

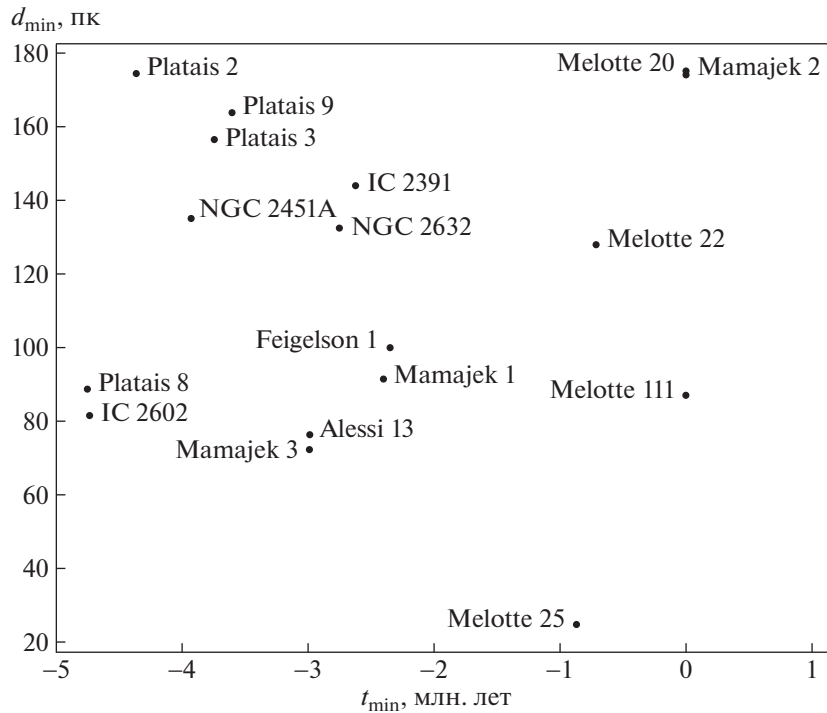
Рис. 3 позволяет наглядно представить расположение Солнца и звезд Гиад. Линию, на которой расположено Солнце, можно представить как орбиту Гиад относительно Солнца в линейном приближении. Перемещение Гиад на небе в течение последних 5 млн. лет определено с помощью пересчета координат из прямоугольной системы (рис. 3) в галактическую и представлено на рис. 4. Положение объекта при движении по участку круговой (для простоты) орбиты вокруг центра Галактики (ЦГ) на расстоянии 8 кпк от ЦГ со скоростью, не превышающей 50 км/с относительно Солнца, и при прямолинейном движении с такой

же скоростью за время  $t = 5$  млн. лет будут отличаться несущественно.

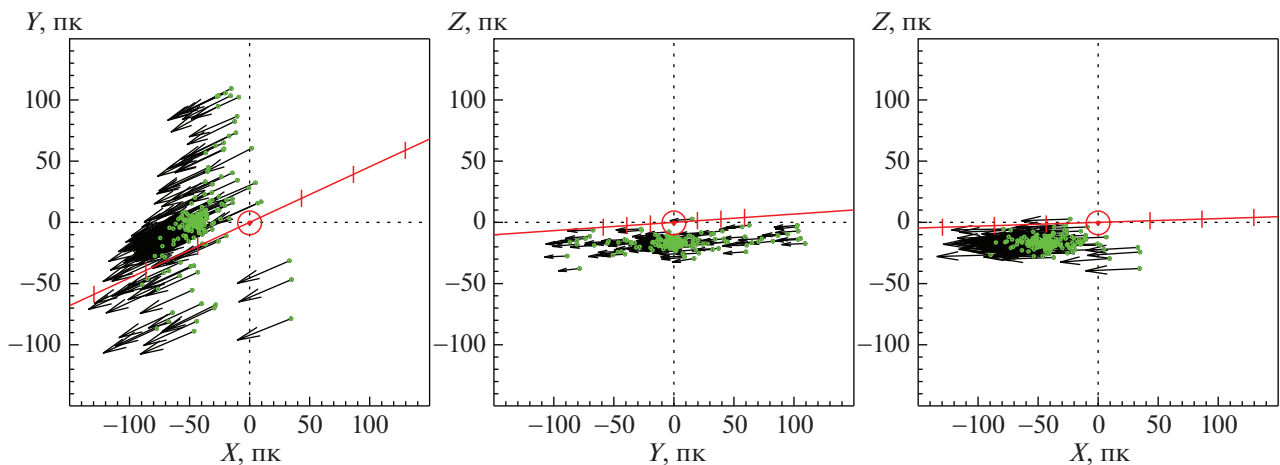
Если центр скопления подходил достаточно близко к Солнечной системе, логично предположить, что некоторые звезды приливных хвостов могли подходить еще ближе. Для изучения сближений звезд приливного хвоста мы использовали каталог [32]. Из 1764 звезд, ассоциированных авторами [32] со скоплением Гиады, для моделирования орбит использовались 283 звезды, для которых известна лучевая скорость  $RV$ . Полученные результаты представлены на рис. 5. На рис. 5 отмечены звезды с самым малым  $d_{\text{min}}$  1) Gaia DR2 332636723777804544  $d_{\text{min}} = 2.11$  пк, 2) Gaia DR2 3131255252997637632  $d_{\text{min}} = 4.04$  пк и 3) Gaia DR2 3328617079087341440  $d_{\text{min}} = 6.33$  пк. Отметим, что среди звезд с самым близким прохождением не обнаружено совпадений с данными из работы [2].

Для оценки ошибок вычислений использовался каталог [11]. В результате было установлено, что ошибки могут изменить вычисляемые значения, в основном, долготы  $l$ , что мало изменит результаты при определении величины сближений  $d_{\text{min}}$ .

Список самых примечательных сближений для звезд Гиад (список членов скопления взят из [32]) и рассчитанные нами возмущения скорости приведены в табл. 5, где даны масса звезды, лучевая скорость  $RV$ ,  $d_{\text{min}}$ ,  $t_{\text{min}}$  и величина  $V_p$ .



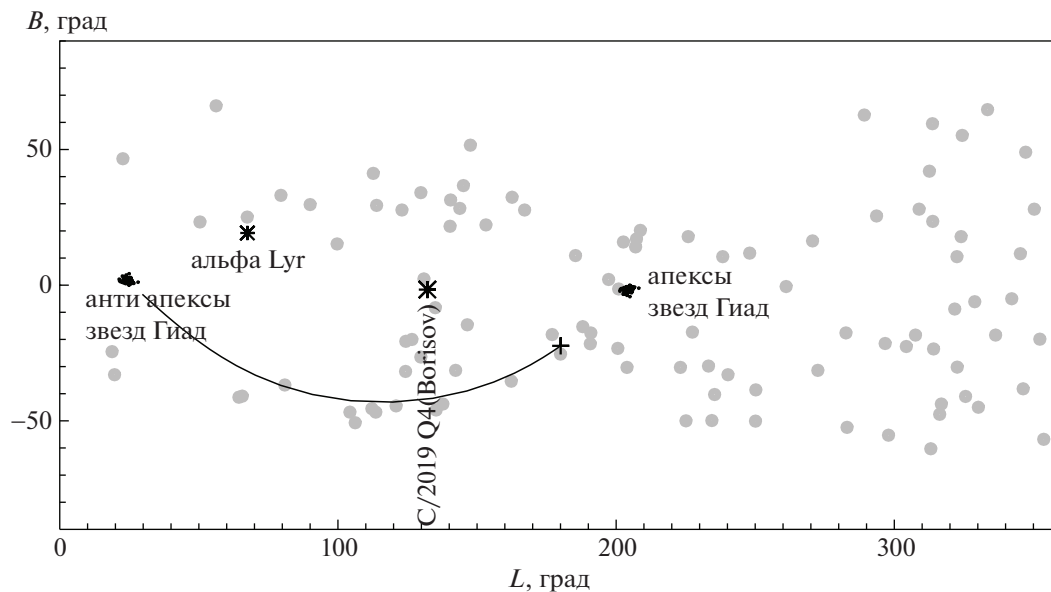
**Рис. 2.** Расстояния  $d_{\min}$ , указанные на LB-диаграмме РЗС (рис. 1), и соответствующие им  $t_{\min}$ . Скопление IC 1396, параметры которого выходят за пределы диаграммы, не нанесено ( $t = -205.22$  млн. лет,  $d = 56.3$  пк).



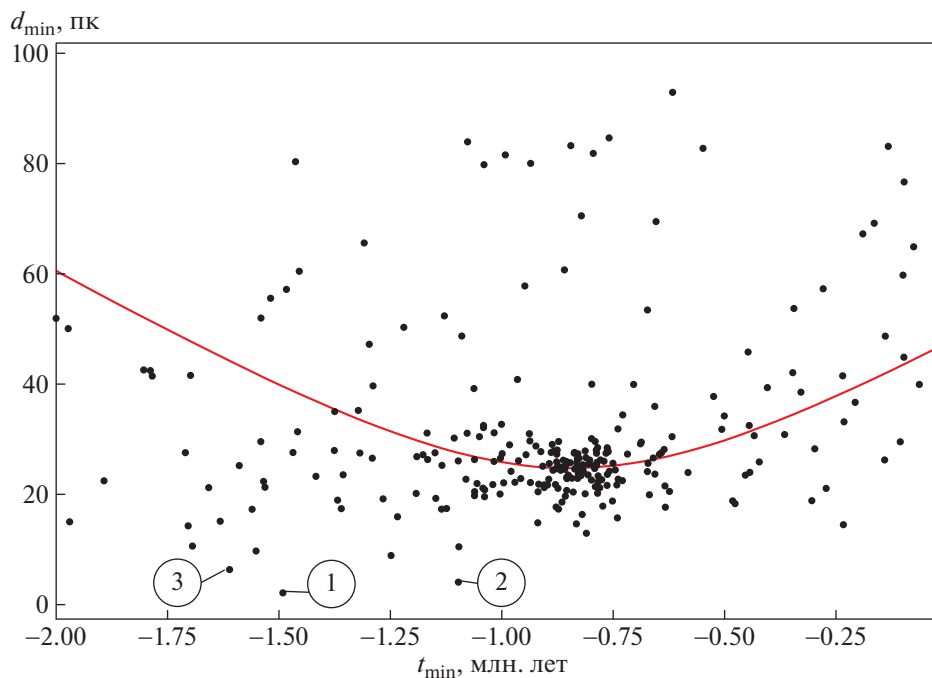
**Рис. 3.** Положения звезд — членов Гиад в галактической системе координат по данным [11]. Зелеными точками показаны звезды Гиад, стрелками — проекции векторов их пространственной скорости. Красная линия — положения Солнца относительно скопления Гиады в разные моменты времени. Штрихами показаны промежутки в 1 млн. лет.

Согласно нашим расчетам, скопление Гиады максимально сближалось с Солнечной системой на расстояние  $d_{\min} = 24.8$  пк. Чтобы определить  $V_p$  для Гиад, мы взяли его массу, равную  $435 M_{\text{sun}}$  (Розер и др. [33]), и увеличили ее в 1.15 раза (Селезнев и др. [34]), предполагая, что существуют 20% компаньонов двойных звезд. Таким образом,

скорость возмущения оказалась равной 0.116 м/с. Это довольно значительная величина. При таком воздействии орбита кометы, находящейся в афелии, изменится существенно. Напомним, что скорость кометы, движущейся по орбите с перигелийным расстоянием 5 а.е. и находящейся в афелии на расстоянии  $10^5$  а.е., составляет 1.63 м/с.



**Рис. 4.** LB-диаграмма. Дугой от апекса до антиапекса (подписаны) Гиад показан трек перемещения центра скопления на 5 млн. лет назад. Серыми точками показаны положения афелиев комет из списка [20].



**Рис. 5.** Сближения с Солнечной системой звезд скопления Гиад (начальные данные о звездах взяты из каталога Лоуди др. [32]). Красной линией показано движение центра скопления, орбита которого рассчитана по данным для Гиад, полученным через запрос в SIMBAD [26].

Возмущения от звезд по сравнению с Гиадами в целом будут невелики, за исключением звезды GDR2 332636723777804544, возмущение скорости при прохождении которой будет лишь в несколько раз меньше, чем для скопления в целом.

Сделаем еще пару замечаний:

1) Гиады проходили ниже (рис. 3) Солнечной системы в галактическом диске, что могло повлиять на появление комет с высокими наклонами орбит.



**Таблица 5.** Звезды Гиад (включая приливной хвост скопления), максимально сближавшиеся с Солнечной системой

Gaia DR2	Масса	$RV$	$d_{\min}$	$t_{\min}$	$V_p$
номер	$M_{\text{sun}}$	км/с	пк	млн. лет	м/с
332636723777804544	0.77	51.09	2.11	-1.49	0.0167
3131255252997637632	0.59	60.07	4.04	-1.10	0.0029
3328617079087341440	0.76	47.12	6.33	-1.61	0.0019
3315967541404032896	1.37	58.90	8.91	-1.25	0.0014
3161147542481872384	0.62	42.96	9.72	-1.55	0.0007

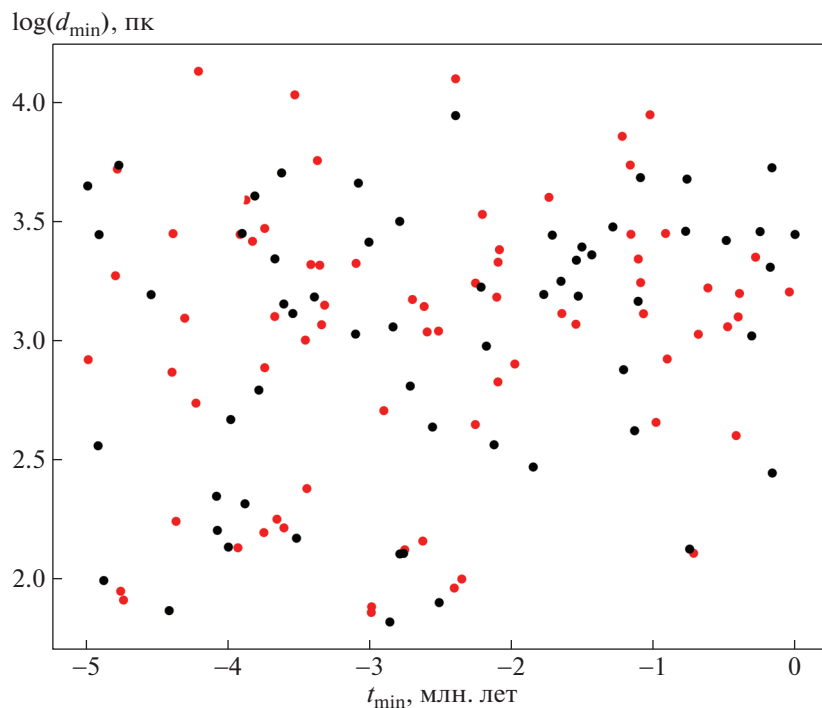
2) Возраст скопления позволяет предположить, что подобные близкие прохождения происходят не в первый раз, а значит, мог иметь место кумулятивный эффект.

#### 4.3. Поиски сближений с далекими скоплениями

Кроме представленных результатов для близких скоплений, поиски сближений проводились по скоплениям из списков [21] и [35]. Из 3006 скоплений, представленных в каталоге MWSC, лучевая скорость известна для 962. Естественно, что мы выбрали только эти скопления. Также мы исключили шаровые скопления и скопления, чей возраст менее выбранного интервала интегрирования (5 млн. лет). В результате мы

взяли 72 скопления и определили для них  $d_{\min}$ , используя RAJ2000, DEJ2000, pmRA, pmDE и  $RV$ . Мы также использовали данные Gaia DR2 о скоплениях из каталога [35], содержащего 861 скопление с известными лучевыми скоростями. Всего из этого каталога были отобраны 58 скоплений. Большая часть скоплений из этих каталогов двигались, монотонно удаляясь от Солнечной системы или приближаясь к ней, поэтому функция расстояния от времени не проходила свой минимум. 129 скоплений (в сумме по обоим используемым каталогам включая перекрытия) проходили минимум, и для них  $d_{\min}$  и  $t_{\min}$  показаны на рис. 6.

Вычисленные нами  $\lg d_{\min}$  и  $t_{\min}$  для скоплений из этих списков, а также входные данные для моделирования, мы представили в виде двух катало-



**Рис. 6.** Диаграмма  $d_{\min} - t_{\min}$  для скоплений из каталогов [21] (красные точки) и [35] (черные точки), включая 21 скопление, являющиеся, как показало сравнение, общими для двух упоминаемых каталогов,  $N$  – число скоплений на рисунке.

**Таблица 6.** Первые 5 строк каталога параметров сближений скоплений с Солнечной системой из каталога по [35]

Название	RA_ICRS	DE_ICRS	$d$	$U$	$V$	$W$	$t_{\min}$	$\lg d_{\min}$
	град	град	кпк	км/с	км/с	км/с	млн. лет	пк
Alessi_13	51.762	-35.821	0.10	-13.38	-23.21	-7.41	-2.86	1.82
Platais_8	136.718	-58.685	0.13	-10.87	-21.81	-3.97	-4.41	1.87
Mamajek_1	130.637	-78.963	0.10	-12.48	-19.8	-11.15	-2.51	1.90
IC_2602	160.613	-64.426	0.15	-8.1	-21.39	-0.77	-4.87	1.99
NGC_2632	130.054	19.621	0.19	-42.76	-20.41	-9.83	-2.79	2.10

**Таблица 7.** Первые 5 строк каталога параметров сближений с Солнечной системой скоплений из каталога по [21]

Название	RA_ICRS	DE_ICRS	$d$	pmRA	pmDE	$RV$	$t_{\min}$	$\lg d_{\min}$
	град	град	кпк	мсд/год	мсд/год	км/с	млн. лет	пк
Mamajek_3	81.50	6.33	0.10	10.00	-32.24	13.10	-2.99	1.86
Alessi_13	52.02	-35.87	0.11	35.80	-3.27	19.50	-2.99	1.88
IC_2602	160.44	-64.40	0.15	-16.95	9.65	21.90	-4.73	1.91
Melotte_111	185.99	26.30	0.09	-11.72	-8.76	-1.00	0.00	1.94
Platais_8	136.88	-59.16	0.14	-15.00	14.80	17.30	-4.76	1.95

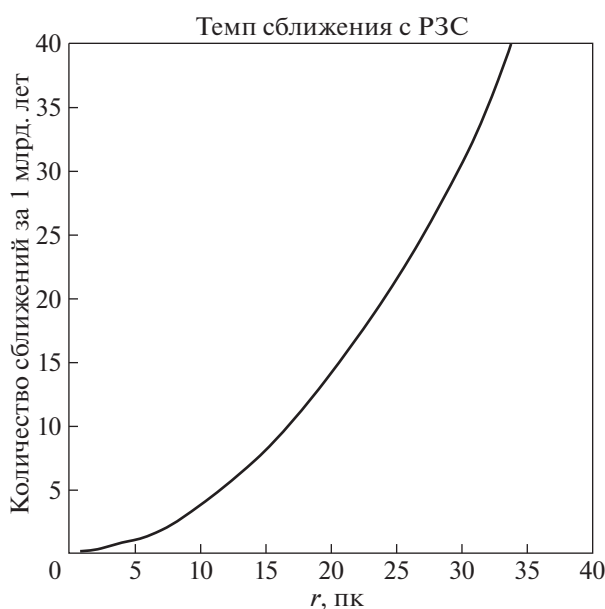
гов, по первых пять строк из которых даны в табл. 6 по данным [35] и табл. 7 по [21].

Мы также оценили частоту сближений с Солнечной системой для всего ансамбля РЗС Галактики. Для этого использован простой и очень быстрый стохастический подход. По сути, этот метод похож на сложный стохастический подход, использованный в [36]. Моделировалось движе-

ние ансамбля не всех  $10^5$  РЗС, а лишь 1000 РЗС (частиц), случайным образом распределенных в расчетном объеме (радиусом 500 пк) вокруг Солнца со средней по объему концентрацией  $10^{-6}$  пк $^{-3}$ . Скорости движения частиц также распределялись случайным образом, причем дисперсия скоростей составляла 10 км/с. Для интегрирования на большие времена, когда частицы могли бы вылетать за пределы счетной области, использовалось граничное условие диффузного отражения (см. более детальное описание в [37]). Фиксировались все сближения этих модельных РЗС с Солнечной системой. Время интегрирования составляло до 4.5 млрд. лет. На рис. 7 представлена зависимость частоты сближений от “прицельного” расстояния  $d_{\min}$  (на графике  $r$ ) до Солнца. Из рисунка видно, что, например, сближения на 25 пк (как обсуждаемое сближение с Гиадами) могут происходить с частотой около 20 событий за один миллиард лет. Конечно, это очень приближенная оценка, сделанная почти “на пальцах”. Однако при моделировании таким способом сближений со звездами мы получили хорошее согласие с работами других авторов, использовавших очень сложные и детальные модели (см. обсуждение в [37]).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе подтверждено, что прохождения скоплений близ Солнечной системы могли вызвать гравитационный эффект, учет которого важен для изучения эволюции облака Оорта.



**Рис. 7.** Частота сближений РЗС с Солнечной системой в зависимости от расстояния сближения.

Нами произведены поиски сближений скоплений с Солнечной системой по следующей схеме: ближайшие к Солнцу скопления (16 скоплений), Гиады, далекие скопления ( $>1500$ ). Полученные результаты сближений представлены на рис. 2 для близких скоплений, рис. 4 и 5 для Гиад и на рис. 6 для далеких скоплений. Расчеты выполнены в определенных рамках упрощений и допущений — мы рассматривали скопления как точечные объекты. Полученные результаты в таком случае, по нашему мнению, отражают явление в целом.

Расчеты выполнены также отдельно для звезд скопления Гиады. Это позволило выявить гораздо более близкие прохождения отдельных звезд по сравнению с центром скопления.

Частота сближений РЗС и Солнечной системы на расстояние  $\sim 25$  пк, достаточное, чтобы вызвать сильные возмущения орбит комет на периферии облака Оорта и появление новых комет или выброс кометных тел в межзвездное пространство, составляет примерно 20 раз за миллиард лет. Нам “повезло”, и сближение скопления Гиады на расстояние 25 пк произошло недавно, около 1 млн. лет назад.

По сравнению со сближениями звезд или с галактическими приливами, сближения с РЗС в целом оказывают менее существенное влияние на вековую эволюцию облака Оорта, но эффект от этих сближений нельзя назвать пренебрежимо малым.

Вычисленные нами параметры сближений скоплений и Солнечной системы оформлены в двух каталогах, размещенных в общем доступе, и могут быть использованы для более детальных расчетов гравитационного взаимодействия с помощью программы N тел.

Отдельный результат данной работы — список новых комет, на появления которых могли частично повлиять возмущения орбит кометных ядер вследствие взаимодействия с РЗС. Список таких пар дан в разделе 3.

Предложенная методика может быть применена не только к кометам Солнечной системы, но и для межзвездных малых тел. В последнем случае представляют интерес расчеты и сравнение орбит малых тел и РЗС, что является продолжением нашей работы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, CDS, Страсбург, Франция, “Астрономическая база данных SIMBAD” [26]. Мы также благодарны за полезные советы Дж. Бови из Департамента астрономии и астрофизики Университета Торонто, в частности, об использовании пакета galry.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование частично выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12009. Б.М. Шустов благодарит РНФ за поддержку грантом 19-71-20089.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. V. Emel'yanenko, D. J. Asher, and M. E. Bailey*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **381**, 779 (2007).
2. *S. Torres, M. X. Cai, A. G. A. Brown, and S. P. Zwart*, Astron. and Astrophys. **629**, A139 (2019).
3. *P. A. Dybczynski*, Astron. and Astrophys. **441**, 783 (2005).
4. *L. Biermann*, in Astronomical Papers Dedicated to Bengt Stromgren, eds. A. Reiz and T. Andersen, Proceedings of the Symposium 327–336 (1978).
5. *M. Jakubík and L. Neslušan*, in Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 2009, vol. 39, no. 2, p. 85–100.
6. *O. A. Mазеева*, Solar System Research **38**, 325 (2004).
7. *R. D. Jeffries*, in EAS Publications Series, eds. C. Reylé, C. Charbonnel, and M. Schultheis, vol. 57, p. 45–89 (2012).
8. *R. Darma, W. Hidayat and M. I. Arifyanto*, in Journal of Physics, International Conference on Mathematics and Natural Sciences, Conf. Ser. 1245 (2019).
9. *A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, and S. Röser*, Astron. and Astrophys. **445**, 545 (2006).
10. *S. V. Vereshchagin and E. S. Postnikova*, in Selected Papers of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, eds. L. Kalinichenko, Y. Manolopoulos, N. Skvortsov, V. Sukhomlin, CEUR Workshop Proc., vol. 2022, p. 30–36 (2017).
11. *S. Meingast and J. Alves*, Astron. and Astrophys. **621**, L3 (2019).
12. *S. Röser, E. Schilbach, and B. Goldman*, Astron. and Astrophys. **621**, L2 (2019).
13. *G. M. Seabroke and G. Gilmore*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **380**, 1348 (2007).
14. *J. Zhao, G. Zhao, and Y. Chen*, Astrophys. J. Lett. **692**, 2, L113 (2009).
15. *T. M. Eubanks*, Astrophys. J. Lett. **874**, L11 (2019).
16. *K. Meech*, in Minor Planet Electronic Circ., vol. 2017-U183 (2017).
17. *M. Micheli, D. Farnocchia, K. J. Meech, et al.*, Nature **559**, 223 (2018).
18. *E. Gaidos, J. Williams, and A. Kraus*, Research Notes American Astron. Soc. **1**, 13 (2017).
19. *F. Feng and H. R. A. Jones*, Astrophys. J. Lett. **852**, L27 (2018).
20. *J. J. Matese and D. P. Whitmire*, Icarus **211**, 2 (2011).
21. *N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Roeser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz*, Astron. and Astrophys. **558**, A53 (2013).
22. *N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin*, Astron. and Astrophys. **371**, 115 (2001).
23. *J. Bovy*, Astrophys. J. Suppl. Ser. **216**, 29 (2015).

24. *J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **275**, 720 (1995).
25. *M. Miyamoto and R. Nagai*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **27**, 533 (1975).
26. *M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al.*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **143**, 9 (2000).
27. *Z. M. Malkin*, *Astronomy Reports* **57**, 128 (2013).
28. *H. Rickman*, *Bull. Astr. Inst. Czechosl.* **27**, 92 (1976).
29. *S. X. Yen, S. Reffert, E. Schilbach, S. Roeser, N. V. Kharchenko, and A. E. Piskunov*, *Astron. and Astrophys.* **615**, 12 (2018).
30. *M. D. Sizova, E. S. Postnikova, A. P. Demidov, N. V. Chupina, and S. V. Vereshchagin*, preprint arXiv:1911.02804 (2019).
31. *C. A. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Mantel, and R. Andrae*, *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
32. *N. Lodieu, R. L. Smart, A. Pérez-Garrido, and R. A. Silvotti*, *Astron. and Astrophys.* **623**, A35 (2019).
33. *S. Röser, E. Schilbach, A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, and R.-D. Scholz*, *Astron. and Astrophys.* **531**, A92 (2011).
34. *A. F. Seleznev, O. I. Borodina, V. M. Danilov, and G. Carraro*, in *Modern Star Astronomy*, XIII Congress of the International Public Organization Astronomical Society, Conference Abstracts, vol. 1, 280 (2018).
35. *C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gómez, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **619**, A155 (2018).
36. *C. A. Mart'inez-Barbosa, L. J'ilkov'a, S. Portegies Zwart, and A. G. A. Brown*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **464**, 2290 (2017).
37. *Б. М. Шустов, С. В. Верещагин, М. Д. Сизова*, *Научн. тр. Инст. астрон. РАН*, в печати (2020).